13 Störgeräusche

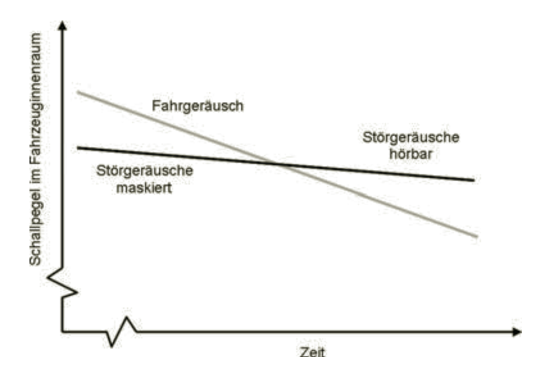


Bild 13-1: Geräuschentwicklung der letzten Jahre (schematisch)

Da der durch Fahrgeräusche verursachte Geräuschpegel im Innenraum von Kraftfahrzeugen aufgrund der anhaltenden Optimierung von Antriebs-, Roll- und Windgeräuschen in den letzten Jahren immer geringer wurde, treten heute störende Nebengeräusche verstärkt in Erscheinung **(Bild 13-1)**. Wie bereits im Namen verankert, sind grundsätzlich alle hörbaren Geräusche die Störpotential besitzen, dieser Kategorie zuzuordnen. Zudem zeigt sich das Phänomen der Fokussierung und Sensibilisierung. Wird ein störendes Geräusch einmal bewusst wahrgenommen, so bleibt es im Vordergrund der Aufmerksamkeit und wirkt dadurch verstärkt belästigend. Die subjektiv empfundene Lästigkeit kann jedoch variieren. Kriterien dafür sind die Auftretenshäufigkeit, die Intensität, die Lokalisierbarkeit, die persönliche Assoziation und der Geräuschcharakter. Begriffe, die den Geräuschcharakter beschreiben, sind meist umgangssprachlicher und lautmalerischer Natur **(Tabelle 13-1)**.

Tabelle 13-1: Gebräuchliche Bezeichnungen für den Geräuschcharakter von Störgeräuschen, nach [14]

Der Nachteil dieser Geräuschbezeichnungen liegt in der Inkonsistenz und Unschärfe der Benennung, da diese Bezeichnungen nur auf der Grundlage eines subjektiv empfundenen Geräuscheindrucks zugeordnet werden. Als erster Schritt zur Objektivierung wurden in [14] den vorstehenden subjektiven Bezeichnungen vier charakteristische physikalische Attribute zugeordnet und damit eine wesentliche Grundlage für die eindeutige Definition der Geräuschphänomene und auch zu deren Messbarkeit geschaffen **(Tabelle 13-2)**.

	Bandbreite		Spektrum			Signalart			Modulation		
	breit	schmal	tief	mittel	hoch	tonal	stochastisch	impulshaltig	langsam	mittel	schnell
Brummen		X	X			X					
Drutzeln	X				X		X				X
Buhen		X		X							
Dröhnen	X			X							
Grollen		X		X						X	
Heulen		X		X							
Kieseln	X					X		X		X	

Tabelle 13-2: Ausgewählte Beispiele für Attribute von Störgeräuschen, nach [14]

13.1 Kontaktstellengeräusche

Speziell Kontaktstellengeräusche (Klapper-, Knarz- und Quietschgeräusche) aufgrund von Relativbewegungen von Bauteilen zueinander werden als Störgeräusche sehr unangenehm wahrgenommen. Sie beeinträchtigen in ganz besonderer Weise den allgemeinen Soliditäts- und Qualitätseindruck eines Fahrzeuges nachhaltig. Daher kommt der Vermeidung und Eliminierung von Kontaktstellengeräuschen große Bedeutung bei der akustischen Gestaltung von Automobilen zu.

Die ins Fahrzeug eingeleiteten Schwingungen (Kapitel 4) pflanzen sich im Interieur fort und können Relativbewegungen und ein Aneinanderschlagen von Bauteilen verursachen. Abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit, der Resonanzfrequenz des Trägerbauteils und dem Energieinhalt der Schwingimpulse entstehen an der Kontaktstelle die Störgeräusche. Kontaktstellengeräusche sind in der Regel instationär und treten zufällig zu unbestimmten Zeitpunkten auf. Für eine subjektive Klassifizierung sind die fünf Begriffe Klappern, Schwirren, Knarzen, Knacken und Quietschen im Regelfall ausreichend. Wichtiger als die Beschreibung des Höreindrucks ist jedoch die Einordnung nach der Art der Entstehung **(Bild 13-2)**. So kann zwischen zwei Grobklassen unterschieden werden: das Aneinanderschlagen und das Haft-Gleit-Reiben (Stick-Slip:Ruckgleiten). Die Hauptvertreter der beiden Gruppen sind das Klappern (Anschlagen) und das Knarzen (Stick-Slip). Alle wei-

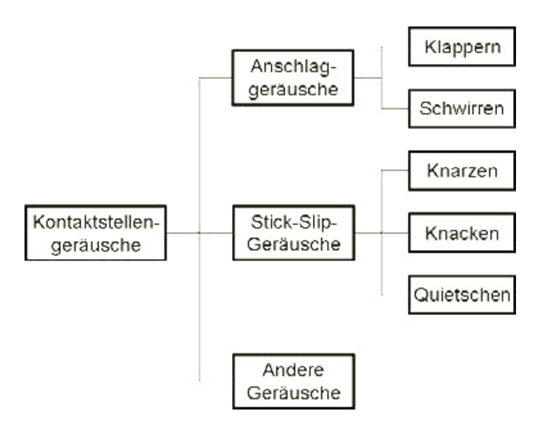


Bild 13-2: Klassifizierung von Kontaktstellengeräuschen

teren Bezeichnungen können den beiden Gruppen zugeordnet werden. Beim Schwirren handelt es sich beispielsweise um ein schnelles Anschlaggeräusch mit hohen Frequenzanteilen, beim Quietschen um ein Stick-Slip-Geräusch mit sehr schnell aufeinander folgenden Einzelimpulsen und beim Knacken um ein singuläres Ruckgleiten. Während sich Zeitstruktur und Frequenzinhalte je nach Umgebungsparameter (z.B. Anbindung, Oberfläche, Klima, Steifigkeit, Kraft) verändern, bleibt die Einordnung in die beiden Hauptgruppen in der Regel bestehen. Neben Anschlag und Stick-Slip gibt es noch andere Störgeräuschursachen, wie z.B. das Lösen von Klebe- und Haftverbindungen. Die Auftretenswahrscheinlichkeit dieser Themen ist jedoch gering, sie werden im Folgenden daher nicht näher betrachtet.

Zunehmende Anforderungen des Designs an geringe Spaltmaße sowie an die Haptik und Optik erschweren die Auslegung nach störgeräuschoptimierten Gesichtspunkten. Ebenso steigt mit den Individualisierungsmöglichkeiten für den Kunden die Anzahl der denkbaren Materialpaarkombinationen, beispielsweise Wurzelholz oder Kunststoffdekor zu Kunststoffträger. Fertigungs- und Montagetoleranzen, unterschiedliche Clip- und Federkräfte, sowie verschiedene Montagepraktiken beeinflussen die Schwingform der Bauteile und bewirken so das Auftreten oder Ausbleiben der Störgeräusche. Auch Umwelteinflüsse machen die Reproduzierbarkeit von Klappern und Knarzen schwierig. Besonders bei Knarzphänomenen ist eine Vorkonditionierung durch Temperatur und Feuchte der „gedächtnisbehafteten" Oberflächen zwingend notwendig [5]. Alterung durch Temperatur- und Feuchteschwankungen, Sonneneinstrahlung und physische Belastung verändert Geometrien, Oberflächeneigenschaften und Steifigkeiten der Bauteile und schwächt deren Anbindungen. Alle Konzepte der Störgeräuschvermeidung sind deshalb über die gesamte Lebensdauer auszulegen.

Aufgrund der enormen Anzahl von Einflussparametern ist es unmöglich, Störgeräusche ausreichend treffsicher vorherzusagen. Vielmehr müssen Auftretenswahrscheinlichkeiten kumuliert berücksichtigt und entsprechende Gegenmaßnahmen getroffen werden. Dabei ist sowohl das Produkt in Bezug auf Geometrie und Anbindungskonzept, als auch der Prozess bei der Montage kritisch zu beleuchten. Die Menge kritischer Kontaktstellen ist von Fahrzeugtyp zu Fahrzeugtyp unterschiedlich und nimmt aufgrund von Gegenmaßnahmen zu den späteren Entwicklungsphasen hin ab. Grob geschätzt ist bei Konzepterstellung von mehreren hundert kritischen Kontaktstellen auszugehen, die im Normalfall bis zur Vorserie auf ca. zehn bis fünfzehn Problemfälle reduziert werden.

13.1.1 Anregungsarten

Die Haupteinflussparameter bilden neben Anregungen aus dem Antriebsstrang die Unebenheitsanregung der Fahrbahnoberfläche (Kapitel 4.1.2) sowie Schwingungsanregungen durch die HiFi-Anlage. Während die Schwingungen und Verwindungen aus Straße und Antrieb das Fahrzeug als Gesamtes erregen, sind die Effekte des Audiosystems meist in lokaler Nähe der Lautsprecher zu finden (Kapitel 13.2). Wählt man als Zielvorgabe und Absicherungsgrundlage Störgeräuschfreiheit auch bei rauer Straßenoberfläche, beispielsweise rauer Asphaltbelag oder glatt verlegtes feines Kopfsteinpflaster, so können die Einflüsse des Antriebstrangs bereits weitgehend vernachlässigt werden. Der Beitrag einer akustik- und schwingungsoptimierten Antriebseinheit ist in diesem Fall klein gegenüber der Anregung von der rauen Fahrbahn.

Schlaglöcher, Kanaldeckel, Schwellen und andere kurzzeitige Fahrbahnanregungen, wie beispielsweise Bahnübergänge und Bordsteinabfahrten, werden unter impulshafter Anregung zusammengefasst. Die angeregten Frequenzen bestimmen sich aus der Impulsdauer und den Federungs- und Dämpfungseigenschaften von Fahrwerk und Karosserie, aber auch aus den Anbindungskonzepten der Interieurbauteile.

Die impulshafte Anregung kann vereinfacht als Dreieckszeitimpuls dargestellt werden (**Bild 13-3**). Der durch den Zeitimpuls angeregte Frequenzbereich ermittelt sich aus der Fouriertransformation (FT) des Zeitsignals $x(t)$:

$$A(f) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot f \cdot t} dt$$

Die Darstellung des Zeitverlaufs als Dreiecksfunktion lässt folgende Vereinfachung der einseitigen Fouriertransformation zu:

$$|A(f)| = \alpha \cdot \beta \cdot \left(\frac{\sin(\beta f)}{\beta f} \right)^2$$

Kurze Impulse, ein hartes Fahrwerk und steife Anbindung erweitern das Anregungsspektrum um höhere Frequenzanteile. Lange Impulse mit großem Wegunterschied (z.B. Bordsteinabfahrt) reduzieren den Frequenzbereich, erhöhen aber die spektralen Amplituden. Sie verwinden das Fahrzeug und forcieren damit Stick-Slip Effekte.

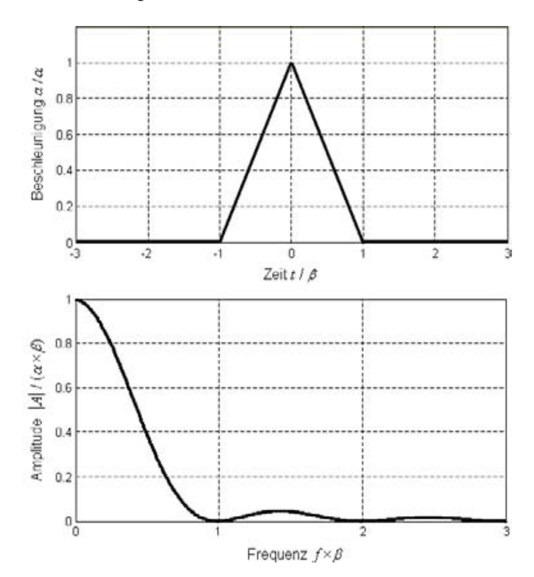


Bild 13-3: Dreieckszeitimpuls (oben) und zugehöriges Spektrum (unten)

Die Zielvorgaben der Prüfimpulse sollten repräsentativen und kundennahen Impulsanregungen entsprechen. Zwar erwartet der Kunde bei Einzelereignissen unterbewusst Reaktionen des Fahrzeugs in Form von Störgeräuschen, verbindet diese aber gleichwohl wie bereits angedeutet mit mangelnder Solidität und minderer Qualität. Impulse durch Fahrzeugmissbrauch können vernachlässigt werden, da hier die Störgeräusche gegenüber den Beeinträchtigungen bei Betriebsfestigkeit und Alterung nur eine untergeordnete Rolle spielen. Die funktionsbedingte Anregung ist Teil der impulshaften Anregungen. Sie tritt beispielsweise beim Schließen des Handschuhkastens, durch Abstützen an Armlehnen und Drücken an Blenden auf. Jedes Bauteil muss dem Anwendungsfall und Einbauort entsprechend durch Verwindung, Druckstempeltest und Beschleunigungsimpulse kontrolliert werden.

Zufällige sowie kontinuierlich auftretende Störgeräusche, welche nicht einzelnen Ereignissen (z.B. impulshafte Anregung) zugeordnet werden können, sind für den Kunden in der Regel noch lästiger. Zum einen ist die Ursache des Geräuschs nicht ersichtlich, zum anderen kann die Störung nicht aktiv beeinflusst oder dauerhaft abgestellt werden, wie z.B. durch langsames Überfahren von Schwellen oder Umfahren von Schlaglöchern. Die Ursache der zufälligen und kontinuierlichen Störgeräusche sind stationäre Schwingungen im Fahrzeug. Sie werden durch gleichmäßig unebenen Straßenbelag aber auch durch Audiobeschallung erregt. Der stationäre Charakter erlaubt den Vergleich verschiedener Schwinganregungen (z.B. unterschiedlicher Straßenbelag) im Frequenzbereich. Die Anregung eines Beschleunigungszeitsignals $a(t)$ kann so durch ein Rauschen mit entsprechendem Leistungsdichtespektrum (Power Spectral Density PSD) beschrieben werden (Kapitel 4.1.2). Durch dieses Verfahren werden impulshafte Ereignisse ausgemittelt. Das PSD errechnet sich aus der Fouriertransformation der zeitlichen Autokorrelationsfunktion R_{xx}. Es gibt an, wie viel Leistung die einzelnen Frequenzen dem Rauschprofil beisteuern **(Bild 13-4)** [7].

Autokorrelationsfunktion (AKF):

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} a(t) \cdot a(t+\tau) dt$$

Leistungsdichtespektrum (PSD):

$$\varphi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau$$

Der Effektivwert a_{eff} des Signals (Root Mean Square RMS) leitet sich von Zeitsignal und vom PSD wie folgt ab:

$$a_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a(t)^2 \, dt}$$

$$a_{eff} = \sqrt{\int_0^\infty \varphi(\omega) d\omega}$$

Für Anschlag-Effekte (z.B. Klappern) kann ein lineares zeitinvariantes Verhalten des Fahrzeugs angenommen werden (Kapitel 13.1.3). Dies bedeutet, dass bei Anregung mit Rauschen gleicher Leistungsdichtespektren identische Störgeräusche auftreten. Wird ein Fahrzeug oder Bauteil mit in allen Frequenzpunkten niedrigerer Leistungsdichte beaufschlagt, so nehmen Störgeräusche in Anzahl und Intensität ab. Für ein höheres Leistungsdichtespektrum gilt diese Aussage in entgegengesetzter Richtung. Dieser Effekt wird in der Bewertung und der Auslegung der Komponenten genutzt (Kapitel 13.1.4). Durch alleinige Angabe des RMS-Wertes ist die Vergleichbarkeit aufgrund der fehlenden Frequenzinformation nicht mehr gegeben. Die zeitinvariante Leistungsdichtezusammensetzung von Straßenanregungen erlaubt eine Nachbildung durch synthetische Signale. PSD-Hüllkurven vereinigen die Anregungsspektren verschiedener Fahrbahn-

oberflächen und dienen als Filtergrundlage eines künstlich generierten Rauschens. So können im Prüfstandsbetrieb mehrere Straßenprofile gleichzeitig durch ein einziges Rauschprofil simuliert werden.

Vibrationen und Schwingungen treten bei Straßenerregung in drei translatorischen und drei rotatorischen Freiheitsgrade auf. Von diesen ist die z-Richtung der Straßenanregung (Normale zur Fahrbahnoberfläche) am stärksten ausgeprägt. Im Prüfstandsbetrieb ist daher eine reine z-Beschleunigung durch die Hydropulsanlage oder den Shaker eine zumeist zulässige Vereinfachung.

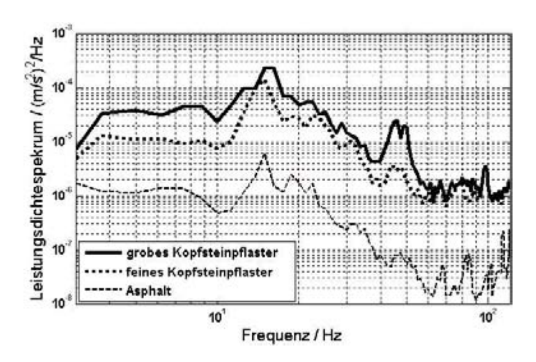


Bild 13-4: Leistungsdichtespektrum an der Karosserie bei verschiedenen Fahrbahnoberflächen

Die Sinusschwingung ist dagegen eine rein synthetische Anregung. Sie dient in erster Linie der Detektion von Störgeräuschen im Prüfbetrieb. In der Realität ist eine sinusartige Anregung mit Oberwellen beispielsweise bei Motoranregung oder Audiosignalen mit ausgeprägter Grundfrequenz zu finden. In Form eines Sweeps mit ausreichend langsamer Sweeprate gilt der Sinussweep als quasistationär. Er durchfährt nacheinander alle Resonanzen der Bauteile und stößt der Reihe nach – eine ausreichende Schwingamplitude vorausgesetzt – alle Störgeräusche des Schwingsystems in den jeweiligen Kontaktstellen an. Der enorme Vorteil des Sinussweep gegenüber der stationären Rauschanregung ist der zeitliche Störgeräuschversatz, wogegen stationäres Rauschen alle Störgeräusche gleichzeitig und zufällig erregt. Es ist allerdings schwierig, ein Rauschprofil in einen Sinussweep zu überführen, der die exakt gleichen Störgeräusche auslöst. Nur durch geschickte Auswahl der Sinusamplitude kann eine Über- oder Unterauslegung in Bezug auf die Störgeräuschfreiheit vermieden werden.

13.1.2 Stick-Slip-Effekt

Der Stick-Slip-Effekt bezeichnet das ruckartige Losreißen zweier sich relativ zueinander bewegender Bauteile **(Bild 13-5)**. Der Übergang zwischen Haften (Stick) und Gleiten (Slip) induziert Schwingungsimpulse, die abhängig von Bauteileigenresonanzen als Luftschall abgestrahlt werden. Ein bestimmender Parameter des Ruckgleitens ist die Normalkraft F_N des Bauteilkontakts **(Bild 13-7)**. Der Kontakt kommt beispielsweise durch Verspannung und Überdrückung zustande, um Designanforderungen nach kleinen Fugen bis hin zur Nullfuge erfüllen zu können.

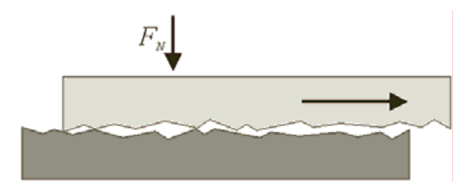


Bild 13-5: Stick-Slip-Effekt (schematisch)

Im physikalischen Modell lässt sich der Stick-Slip-Effekt folgendermaßen beschreiben **(Bild 13-7)**: Während des Haftens baut sich infolge der elastischen Verformung der Kontakt-Bauteile eine Federkraft F_F auf [13]. Erreicht die Federkraft die maximale Kraft der Haftreibung F_{Haften}, beginnt mit einem ruckartigem Losreißen die Gleitphase. Im Gleitvorgang wirkt die Gleitreibungskraft $F_{Gleiten}$ der Federkraft solange entgegen, bis die gespeicherte Energie der Feder abgebaut ist und die Gleitreibung die Federkraft überschreitet. Ein erneutes Haften beginnt **(Bild 13-6)**.

$$F_{Haften} = \mu_H \cdot F_N$$

μ_H Haftreibungskoeffizient

$$F_{Gleiten} = \mu_R \cdot F_N$$

μ_R Gleitreibungskoeffizient

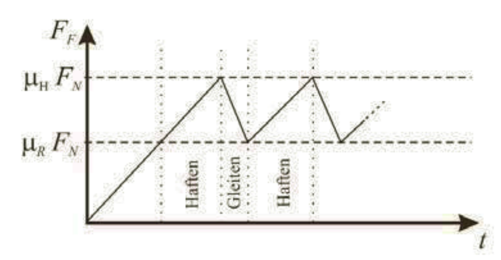
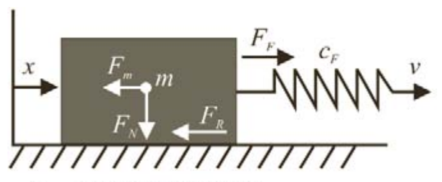


Bild 13-6: Federkraft

Zur Vermeidung des Stick-Slip-Effekts sind sowohl aktive, als auch reaktive Maßnahmen möglich. Aktive Maßnahmen setzen Wissen über eine Kontaktstelle voraus, bevor diese zum echten Problem wird. Reaktive Schritte werden eingeleitet, wenn das Problem in einer späten Entwicklungsphase erkannt wird und konstruktive Änderungen am Bauteil und Konzept nicht mehr möglich sind. Aktives Eingreifen ist in der Regel kostengünstiger als reaktive Handlungen. Es ist also wünschenswert, Probleme in einer frühen Phase

zu erkennen und rechtzeitig Änderungen einzubringen. Im Folgenden werden beide Arten am Stick-Slip-Effekt dargestellt.



F_m Massenkraft (Trägheit)
F_R Reibkraft
F_N Normalkraft
F_F Federkraft
c_F Federkonstante
v Geschwindigkeit
x Weg
m Masse

Bild 13-7: Modelldarstellung Stick-Slip-Effekt

Ohne eine entsprechende Normalkraft kommt es weder zu Haft- noch zu Gleitreibung. Dies kann durch konstruktive Änderungen der Bauteile und Hinzufügen von Spalten erreicht werden. Die gezielte Beeinflussung der Reibungskoeffizienten ist eine weitere Möglichkeit. Ziel ist es, den Haftreibungskoeffizienten μ_H dem Gleitreibungskoeffizienten μ_R anzunähern. Durch geeignete Oberflächenbeschichtungen (reaktive Maßnahme: z.B. Antiknarzlack) oder Oberflächenstrukturen (aktive Maßnahme: Narbung) wird der Haftreibungskoeffizient gesenkt. Dadurch entstehen mehrere kleine Ruckgleiteffekte mit geringem und unhörbarem Losreißimpuls. Für $\mu_H = \mu_R$ ist per se kein Stick-Slip mehr vorhanden.

Ein alternatives aktives Vorgehen versucht den Haftreibungskoeffizienten enorm anzuheben. Die Federkraft kann die maximale Haftreibung nicht übersteigen und ein Gleiten bleibt damit aus. Starre Verbindungen (z.B. Klebe- und Schweißverbindungen) oder Abstützrippen sind hierbei als Lösung denkbar.

Neben den genannten Maßnahmen auf der Produktseite, muss auch der Fertigungs- und Montageprozess kritisch beleuchtet werden. Hier ist beispielsweise für ein kontinuierlich sauberes Aufbringen von Antiknarzlacken und für eine exakte Montage der Bauteile zu sorgen. Über die Lebensdauer verändern sich Oberflächenbeschaffenheit und Reibeigenschaften. Die Wirksamkeit von Anti-Knarz-Maßnahmen muss deshalb auch im gealterten Zustand gewährleistet bleiben.

Die zeitliche Abfolge mehrerer Losreißimpulse folgt meist keiner gleichmäßigen periodischen Struktur, sondern besitzt vielmehr progressive oder degressive Zeiteigenschaften. Sie ist abhängig von der Art des Anregungssignals, welches bei Verwindung, Belastung und Druck eine sinus- oder halbsinusförmige Wegamplitude beschreibt **(Bild 13-8)**. 90 Prozent aller Knarzer, Knacker und Quietscher werden bei einer Anregungsfrequenz zwischen 0,1 Hz und 5 Hz ausgelöst.

Singuläre Stick-Slip-Effekte bezeichnet man als Knacken. Elastische Materialoberflächen vergrößern mit bestehender Kontaktzeit durch Adhäsion ihre realen Kontaktflächen [5]. So ist nach längerer Standzeit die angestiegene Haftreibung nur einmal zu überwinden, was die Reproduzierbarkeit des singulären Impulses erschwert. Neben Standzeiten beeinflussen auch Klima und Witterung das Ruckgleiten. Temperatur und Feuchte variieren die Eigenschaften des „gedächtnisbehafteten" Oberflächenmaterials und verändern deren Stick-Slip-Neigung enorm. Materialpaarungen sind daher unter allen kundenrelevanten Temperatur- und Feuchtebedingungen zu analysieren (Kapitel 13.1.4).

Das beim Stick-Slip abgestrahlte Luftschallsignal ist in der zeitlichen Impulsfolge vom Anregungssignal und Reibungskoeffizienten der Oberflächen abhängig. Betrachtet man einen einzelnen Luftschallimpuls, so bestimmt sich dieser jedoch durch die Resonanz- und Dämpfungseigenschaften der reibenden Bauteile. Dies ist vergleichbar mit einer Geigensaite, die ebenfalls durch Ruckgleiten des Bogens mit vielen Impulsen beaufschlagt wird, jedoch ihrer Resonanz entsprechend klingt. Ein Stick-Slip-Risiko kann zwar durch die Prüfung der Oberflächenmaterialien analysiert werden, die Ausprägung und der Klang des Ruckgleitens sind jedoch von Resonanz und Dämpfung der kontaktierenden Bauteile abhängig.

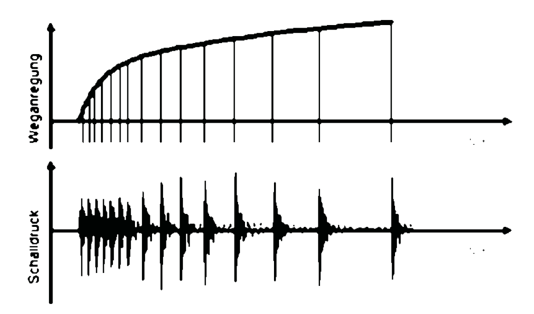


Bild 13-8: Degressive Impulsfolge beim Knarzen

13.1.3 Anschlag-Effekt

Bei Beschleunigungsanregung können aufgrund geringer Bauteilabstände Anschlag-Effekte, wie Klappern oder Schwirren, auftreten. Dabei müssen die Resonanzfrequenzen der Komponenten im Anregungsspektrum (PSD) ausreichend stark vorhanden sein. Die meisten Anschlag-Vorgänge gelten als linear und zeitinvariant. Dies erlaubt die vereinfachte

Darstellung komplexer Anschlag-Effekte in einem vereinfachten Zwei-Einmassenschwingermodell **(Bild 13-9)**. Die Bewegungsgleichung eines einzelnen Einmassenschwingers mit Fußpunktanregung lautet im Laplace-Bereich ohne Berücksichtigung von Stößen ($\Delta_x > 0$):.

$$\frac{x(s)}{a(s)} = \frac{1}{s^2} \cdot \frac{2D\omega_0 s + \omega_0^2}{s^2 + 2D\omega_0 s + \omega_0^2}$$

mit

$$D = \frac{d}{2\sqrt{m \cdot c}}; \qquad \omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}};$$

m	Masse
c	Federsteifigkeit
d	Dämpfungskonstante
ω_0	Eigenkreisfrequenz
a	Anregungsbeschleunigung
x	Wegauslenkung
D	Dämpfungsmaß

Der Stoßprozess der Oberflächen ist abhängig von den Oberflächenmaterialien und kann ebenfalls vereinfacht als Feder-Dämpfer-System abgebildet werden. Das Kontaktmodell erweitert das Zwei-Einmassenschwingermodell. Dadurch wird dieses für die Dauer des Kontakts zum Mehrmassenschwinger erweitert (**Bild 13-9** und **Bild 13-10**). Die Parameter c_{ObF1} und c_{ObF2} bezeichnen dabei die Federkonstanten der Materialoberflächen und r_{ObD1} und r_{ObD2} deren Dämpfung. ξ_1 und ξ_2 beschreiben die Eindringtiefe beider Materialien im Anschlag.

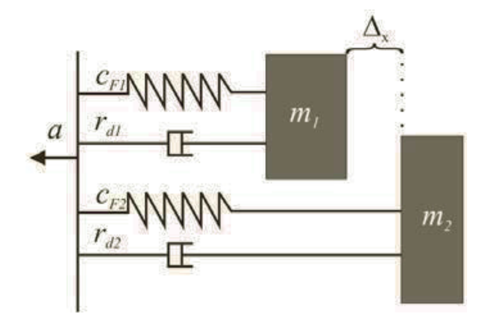


Bild 13-9: Modelldarstellung Zwei-Einmassenschwinger

Schlagen zwei harte Oberflächen mit einer hohen Federsteifigkeit und niedrigen Dämpfung aneinander, kommt es zu einem starken Klapperimpuls und einer hohen Rückstellkraft der Massen. Je härter die Materialpaarung desto impulshafter ist auch der abgestrahlte Luftschallimpuls. Die restlichen Klangeigenschaften des Anschlagimpulses bestimmen sich, wie bereits beim Stick-Slip-Effekt, aus den Resonanz- und Dämpfungseigenschaften der Bauteile.

Abstellmaßnahmen sind je nach Entwicklungsphase aktiv oder reaktiv zu treffen (Kapitel 13.1.2). Eine gängige reaktive Methode ist das Kleben von Filzen oder Textilbändern. Sie erhöht die Dämpfung der Kontaktstelle und mindert den Anschlagimpuls. Filzstreifen, die dicker als der Bauteilabstand sind, vermeiden durch Überdrückung ein Schwingen. Hier sind jedoch die Kosten (Material, Montage), die Prozessunsicherheit (richtiges Verkleben), Einflüsse auf Stick-Slip und die Haltbarkeit (Verschleiß) kritisch zu analysieren. Kraftschlüssig verbundene Bauteile sind eine Lösungsmöglichkeit aktiver Anschlagvermeidung. Überdrückung von Kontaktflächen unterbindet Klappern, forciert jedoch unter Umständen Stick-Slip-Effekte. Schwingende Elemente können zusätzlich versteift oder durch größeren Bauteilabstand am Aneinanderschlagen gehindert werden. Letzteres ist im Prozess durch exakte Montage zu gewährleisten. Im Alterungsvorgang variieren Interieurkomponenten in Größe, Form und Anbindungen. Lose Clip-Verbindungen und veränderte Bauteilabstände generieren neue Anschlag-Effekte. Konzept und Maßnahmen müssen daher über die Lebensdauer der Bauteile hin ausgelegt werden.

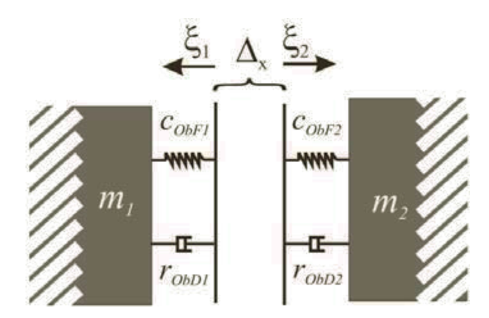


Bild 13-10: Modellerweiterung bei Kontakt der Materialoberflächen

Im Luftschallsignal treten Klapperimpulse bei Rauschanregung zufällig auf. Dabei richtet sich die Häufigkeit und Intensität der Impulse nach Bauteilabstand und Resonanzüberhöhungen. Eine Separierung mehrerer Störgeräusche ist wegen der unbekannten Auftrittszeitpunkte und gleichzeitigem Auftreten nur schwer möglich (Kapitel 13.1.4). Anschlagrelevante Anregungsfrequenzen bewegen sich zwischen 5 Hz und 500 Hz. Während Frequenzen unter 5 Hz meist Ruckgleiten auslösen, sind Körperschallfrequenzen über 500 Hz normalerweise nicht oder nur in sehr geringem Umfang vorhanden. Folglich reicht für Straßen-, Antriebs- und Audioanlagenschwingungen eine Betrachtung dieses Anregungsfrequenzbereiches aus.

Mittels Sinuserregung (z.B. konstante Motordrehzahl) erscheinen Klapperimpulse im Luftschallsignal dauerhaft und periodisch. Stimmen Sinusfrequenz und Bauteilschwingresonanz überein, so kommt es bei ausreichend großer Anregungsamplitude zum Anschlag-Effekt. Die abgestrahlten Luftschallimpulse repetieren entsprechend der Erregungsfrequenz und deren Harmonischen.

13.1.4 Bewertungs- und Auslegungskriterien

Im Gegensatz zu Sound Engineering, das Geräusche auf Wohlklang und Kundengefallen trimmt, steht bei Störgeräuschen die Lästigkeit und damit deren Vermeidung im Vordergrund. Da der Kunde keine Störgeräusche erwartet, gilt grundsätzlich: *„Störgeräusche muss man nicht bewerten, sondern abstellen!"*. Jedoch ist eine Priorisierung der Maßnahmen nach Auftretenswahrscheinlichkeit und Lästigkeit im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Betrachtung notwendig und sinnvoll.

Hör- und Bewertungsversuche, die an verschiedenen Kundengruppen durchgeführt wurden [15], zeigen, dass Störgeräusche anhand ihres Höreindrucks nur wenig einheitlich bewertet werden. Dies gilt gleichermaßen für die Darbietung von Störgeräuschen via Kopfhörer, als auch für das Probandenurteil im realen Fahrzeug bei konstanter Kopfsteinpflasteranregung. Die Studie verdeutlicht eine weitere Eigenheit von Störgeräuschen. Während einige Geräusche von Personen als „sehr lästig" bewertet werden, werden dieselben Geräusche von anderen Personen gar nicht wahrgenommen. Erst der Hinweis auf die Problemstelle lenkt die Aufmerksamkeit auf diese. Einmal wahrgenommen, werden nun die zuvor ignorierten Störgeräusche ebenfalls als „sehr lästig" eingestuft. Eine Priorisierung und Lästigkeitseinstufung anhand von menschlichen Sinneseindrücken und psychoakustischen Parametern gestaltet sich daher als schwierig.

Eine weitere Untersuchung aus [15] überprüft die Erwartungshaltung des Kunden gegenüber dem Auftreten von Störgeräuschen. Sinneseindrücke aus Hörkonserven oder realen Fahrzeugbewertungen wurden hier gezielt ausgeklammert, um die reine Erwartungshaltung und situationsbezogene Akzeptanz zu beleuchten. Die Ergebnisse dieser Umfrage sind in **Bild 13-11** dargestellt. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei geringer Fahrzeuganregung (z.B. Stadtfahrt mit konstanter Geschwindigkeit auf Asfalt) die Akzeptanz von Störgeräuschen deutlich geringer ist als bei starker Anregung (z.B. Kopfsteinpflaster oder Schlaglöcher). Dies zeigt, dass eine Lästigkeitspriorisierung abhängig von unterschiedlichen Anregungsstufen sinnvoller und zielführender ist als Bewertungen anhand akustischer und psychoakustischer Parameter.

Im Folgenden werden Ansatzpunkte für die unterschiedlichen Entwicklungsphasen vorgestellt, um die Lästigkeit und Störgeräuschwahrscheinlichkeit direkt und indirekt zu bewerten **(Bild 13-12)** [6]. Bereits in der Konstruktionsphase fließen Erfahrungen von Vorgängermodellen in die Konzepte mit ein. Hier können ohne großen Aufwand Anbindungen, Abstände, Überdrückungen, Abstützrippen und Versteifungen optimiert werden.

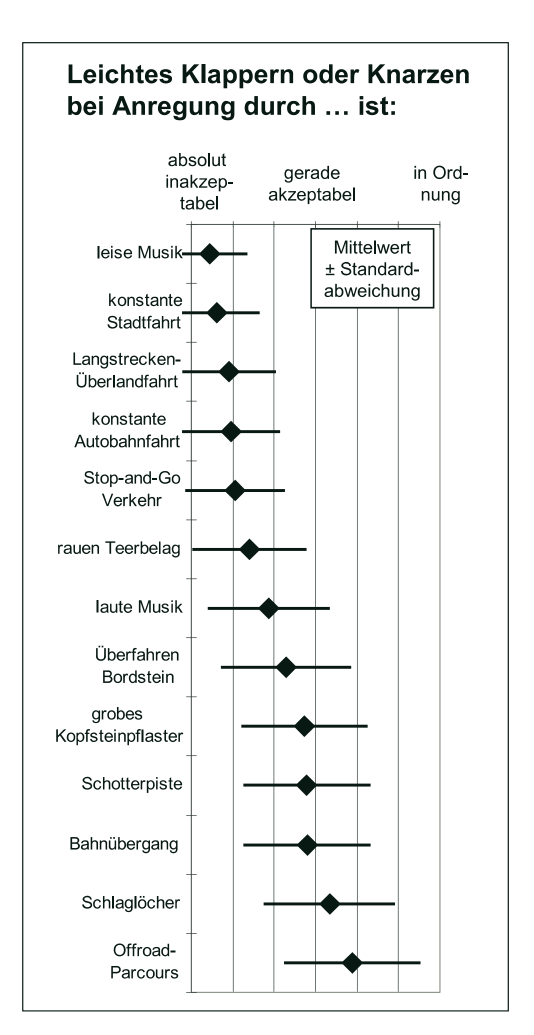


Bild 13-11: Kundenakzeptanz von Störgeräuschen bei unterschiedlichen Fahrzeuganregungen, nach [15]

Mit Hilfe von Oberflächenhärten, Zwischenräumen und Verbindungseigenschaften werden bereits im statischen Zustand, d.h. ohne virtuelle Anregung,

Aussagen über Störgeräuschrisiken getroffen **(Bild 13-13)**. Eine dynamische Kontaktstellenbetrachtung sichert die statisch gewonnenen Erkenntnisse mit den praxisrelevanten Anregungsspektren ab [8]. So kann anhand einer virtuellen Anregungssteigerung und der Simulation von Bauteildurchdringungen und Kontaktkräften eine erste kundenrelevante Priorisierung vorgenommen werden.

Mit dem Bau von Prototypen-Teilen beginnt die versuchstechnische Absicherung am Prüfstand. Zunächst ist für die Störgeräuschfreiheit der einzelnen Komponenten zu sorgen. Ist diese gewährleistet, können zusätzliche Risikoschnittstellen des Zusammenbaus an Subgruppen und zuletzt am Gesamtfahrzeug analysiert werden.



Bild 13-12: Integrierte Störgeräuschabsicherung

Speziell die versuchstechnische Absicherung muss unter Berücksichtigung von kundenrelevanten Gesichtspunkten wie Auftretenswahrscheinlichkeit im Alltagsfahrbetrieb, Erwartungshaltung, Präsenz und Lästigkeit erfolgen. Der normale Kunde fährt am häufigsten über glatte Straßen und erwartet hier absolute Störgeräuschfreiheit. Störgeräusche, die erst bei grobem Kopfsteinpflaster oder Schlaglöchern auftreten, werden dagegen eher toleriert **(Bild 13-11)**. Diese Bewertungsmethode berücksichtigt indirekt Auftretenswahrscheinlichkeit, Erwartungshaltung, Präsenz und Lästigkeit, ohne Anwendung psychoakustischer Luftschallanalyse. Für stationäre Erregungen wird dies mit Hilfe von steigenden synthetischen Rauschanregungen umgesetzt. Ist das Anregungsspektrum in allen Frequenzen gleich oder über dem schwächeren Profil, nehmen Anzahl und Intensität der Störgeräusche zu [16]:

Für $PSD_1(f) \le PSD_2(f)\ \forall\ f$ gilt

$$A \subseteq B$$

$$N_{Störgeräusche} \mid PSD_1 \le N_{Störgeräusche} \mid PSD_2$$

$$I_{Störgeräusche} \mid PSD_1 \le I_{Störgeräusche} \mid PSD_2$$

A	Menge aller Störgeräusche bei Anregung durch PSD_1
B	Menge aller Störgeräusche bei Anregung durch PSD_2
$N_{Störgeräusche}$	Anzahl der Störgeräusche
$I_{Störgeräusche}$	Intensität der Störgeräusche

Geräusche, die also bereits bei niedriger Anregung auftreten, werden in ihrer Relevanz höher priorisiert. Die Nachbildung stationärer und impulshafter Anregungen erfolgt am Prüfstand mit Hydropulsanlagen und geräuscharmen Shakern, welche die gemessenen oder künstlichen Frequenz- und Zeitsignale am Gesamtfahrzeug und an Einzelkomponenten nachfahren [10, 11].

Der Sinussweep bietet neben der Straßen- und Rauschanregung weitere Vorteile. Die zeitlich versetzte Anregung der Frequenzen lässt beim Sinussweep die Störgeräusche nacheinander und in ihrer jeweiligen Bauteil-Resonanzfrequenz auftreten. Die Detektion, die Analyse und die Dokumentation der Problemstellen vereinfachen sich dadurch erheblich. Mit Hilfe eines in [17] vorgestellten Berechungsverfahrens lässt sich aus beliebigen Zeitdaten und Rauschprofilen ein Sinussweep generieren, der die identischen Störgeräusche wie das Ursprungssignal hervorruft:

$$A_{\sin}(f) = Q_p(f) \cdot \sqrt{2} \cdot k$$

$$Q_p(f) = Quantil(\{|H_n(f)|\}, p)$$

$A_{\sin}(f)$	frequenzspezifische Sinusamplitude
$Q_p(f)$	frequenzspezifisches spektrales Quantil
$\{\lvert H_n(f)\rvert\}$	Menge aller Beträge der fouriertransformierten n Zeitabschnitte des Ursprungsignals
k	Verstärkungsfaktor zum Ausgleich der fehlenden Gegenbewegung (worst case: $k = 2$)

Der reale Bezug zur Straße bleibt daher trotz eines synthetisch generierten Sinus weitgehend erhalten. Die Kombination von Sinusmethode und unterschiedlichen Anregungsstufen ermöglicht eine gekoppelte Geräuschbewertung mit vereinfachter Analyse und Dokumentation.

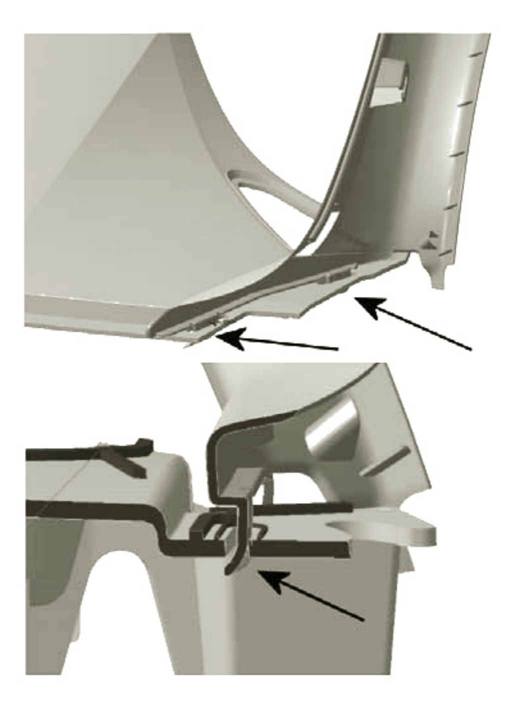


Bild 13-13: Virtuelle Kontaktstellenanalyse

Obwohl die Verwendung unterschiedlich starker aber fest definierter Anregungsstufen der Störgeräuschbeurteilung zu einer gewissen Objektivierung verhilft, so ist letztendlich doch noch eine subjektive Bewertung notwendig. Trifft der Mensch die binäre Entscheidung „Geräusch vorhanden“ bzw. Geräusch nicht vorhanden“, so sind die Rahmenbedingungen der Analyse genau zu definieren (z.B. Ohrabstand zum Bauteil, Hintergrundgeräusch der Prüfumgebung). Zusätzliche Luftschall-Auswertetools objektivieren auch diese Fragestellung und vereinfachen Vorgaben in Prüfvorschriften und Lastenheften. Eine in [16] beschriebene Software-Applikation entfernt stationäre Hintergrundgeräusche und untersucht den Luftschall auf transiente Impulse. Anschließend werden Gruppen gleich klingender Störgeräuschimpulse gebildet. Auf diesem Wege ist es möglich, objektiv zu dokumentieren, ob und wann welcher Geräuschtyp im zeitlichen Verlauf aufgetreten ist.

Neben der Analyse am Bauteil selbst, unterstützen Materialversuche die Minimierung von Kontaktstellengeräuschen. Der Stick-Slip-Effekt kann durch geeignete Oberflächenmaterialpaarungen reduziert werden. Ein Knarzprüfstand bewegt hierzu zwei Proben mit definierten Relativgeschwindigkeiten und Anpressdrücken zueinander. Die Messung der Ruckgleitimpulse (Beschleunigungen) gibt Aufschluss über das Knarzrisiko der entsprechenden Materialpaarung.

Auch Ortbarkeit und persönliche Assoziationen beeinflussen die menschliche Wahrnehmung. Klingt beispielsweise ein Störgeräusch nach Beschädigung, ist es wesentlich lästiger als das Klappern des eigenen Schlüsselbundes in der Kartentasche. Da diese Assoziationen rein subjektiver Natur und von Person zu Person zu verschieden sind, kann eine objektive Beurteilung entsprechend dieser Kriterien nicht erfolgen [15].

Verdeckungseffekte des Fahrgeräuschs können Nutz- und Störschalle verbergen [2, 9]. Grundsätzlich stören deshalb scharfe und impulshafte Geräusche [3, 4, 12] am meisten, da sie am wenigsten von dem tieffrequenten Hintergrundgeräuschs des Fahrzeugs verdeckt werden und somit am deutlichsten hörbar sind. Die resultierende Wahrnehmbarkeit errechnet sich aus den Verdeckungskurven der Frequenzgruppen (Kapitel 7.3) [1]. Geräusche, die stärker über die Maskierungskurven ragen, sind demnach dominierender und lästiger.

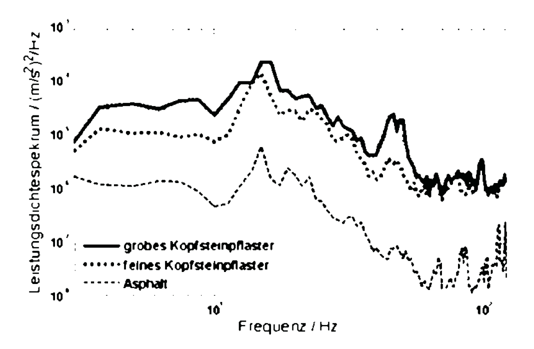


Bild 13-14: Anregungssteigerung synthetischer Fahrbahnprofile

Zur Fehleranalyse und -behebung ist es notwendig, den genauen Ort und somit die Ursache von Klappern und Knarzen zu finden. Eine Sinus-Sweepanregung und ein Sondenmikrofon mit Verstärker und Kopfhörer erleichtern die Ortung. Durch den Sweep erscheinen Störgeräusche – je nach Eigenresonanz – nacheinander und können durch das Halten der Resonanzfrequenz eindeutig identifiziert werden [16]. Demontage und örtliche Schwingungsunterdrückung (z.B. durch Daumendruck) spüren die exakte Kontaktstelle auf.

Die Störgeräuschfreiheit in Produkt und Prozess wird auf die volle Lebensdauer eines Fahrzeugs ausgelegt und abgesichert. Prüfstände mit Sonnensimulation, Klimawechsel und physischer Belastung (Hydropulsanlage) lassen Fahrzeuge künstlich altern und ermöglichen die Störgeräuschanalyse in verschiedenen Klima- und Alterungsstufen.

13.2 Audio-Störgeräusche

Die Qualität der Wiedergabe von Audio-Signalen stellt speziell bei Premium-Automobilen mit hochwertigen HiFi-Anlagen bei Kundenbefragungen immer wieder einen hochprioren Beanstandungspunkt dar. Dafür sind in der Regel keine Störungen im elektrischen Teil der Audio-Anlage verantwortlich. Vielmehr sind in vielen Fällen mechanische Störgeräusche die Ursache der Beanstandungen. Nur eine sorgfältige Integration der Audio-Anlage in das Fahrzeug stellt sicher, dass das Potential des elektrischen Audio-Systems auch zu einem entsprechend angemessenen Klangerlebnis im Fahrzeug-Innenraum führt.

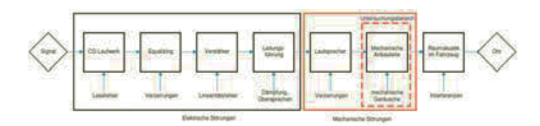
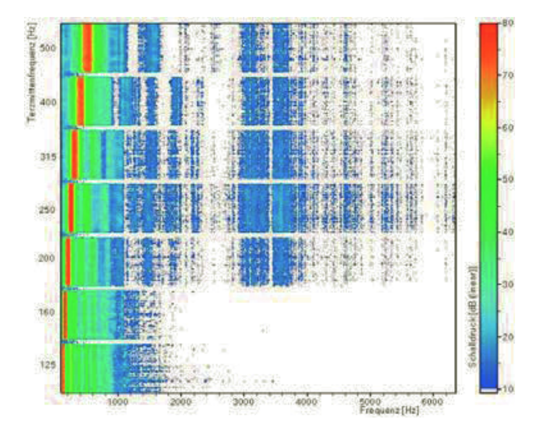


Bild 13-15: Potentielle Störgeräuschquellen bei der Audio-Übertragung

Insbesondere die Wechselwirkung der Lautsprecher mit den umgebenden Interieur-Teilen stellt sich hier als kritisch heraus. Erfolgt die mechanische Befestigung der Lautsprecher beispielsweise in relativ biegeweichen Verkleidungsteilen und nicht an der Rohbaustruktur, so wird durch die elektrodynamische Anregung nicht nur die Lautsprechermembran beschleunigt, sondern infolge der Reaktionskraft auch das Verkleidungsteil zu mechanischen Schwingungen angeregt. Dies führt sowohl zu einem verringerten akustischen Wirkungsgrad des Lautsprechers (akustischer Kurzschluss), als auch zu Verzerrungen infolge der akustischen Abstrahlung der schwingenden Verkleidungsteile. Bei hohen Amplituden kommt es zusätzlich zu äußerst unschönen Anschlaggeräuschen (Schwirren, siehe auch Kapitel 13.1.3).

Die HiFi-Erregung ist stark richtungsabhängig. Ebenso spielt die Einbauweise des Lautsprechers eine große Rolle, da hier, im Gegensatz zu Straße und Antrieb, neben Körperschall auch der abgestrahlte Luftschall das Auftreten von Störgeräuschen beeinflusst. Die Störgeräuschfreiheit ist daher mit dem real verbauten HiFi-System abzusichern. Für die qualitative und quantitative Beurteilung der oben genannten Störeinflüsse hat sich die Anregung der Audio-Anlage mit Terzrauschen bewährt. Treten in bestimmten Terzbändern vorstehend genannte Probleme in Erscheinung, so lassen sich im Luftschall neben dem Anregungssignal (Musik, Sprache) auch noch höherfrequente Störanteile infolge von Klappern und Schwirren detektieren. In **Bild 13-16** ist das entsprechende Luftschallsignal für eine ungünstige und eine optimierte Lautsprecher-Einbausituation aufgezeichnet. Deutlich sind die höherfrequenten Störanteile zu erkennen.



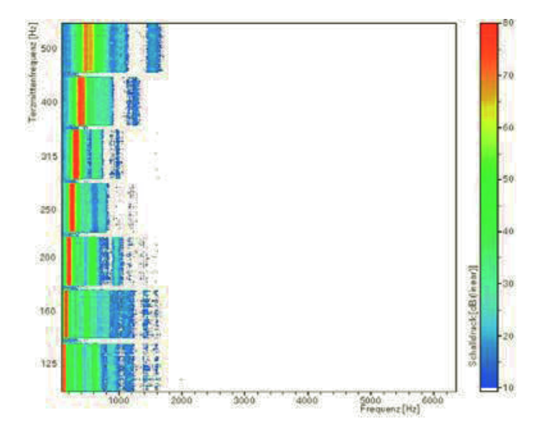


Bild 13-16: Mechanische Störgeräusche Mitteltonlautsprecher Ausgangszustand an Türverkleidung (oben) und optimierter Stand an Rohbau (unten)

Für die quantitative Bewertung der subjektiven Übertragungsqualität sind zusätzlich die Verdeckungseffekte entsprechend der Lautheitsbestimmung nach Zwicker zu berücksichtigen (Kapitel 7). Nur Störanteile die oberhalb der Verdeckungsschleppe liegen, tragen auch tatsächlich zum Lautheitseindruck der Störung bei (**Bild 13-17**).

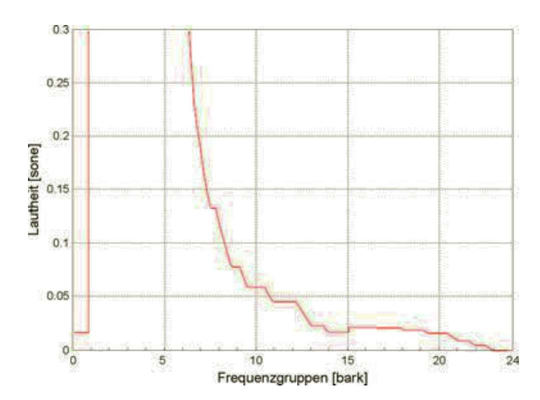


Bild 13-17: Verlauf der spezifischen Lautheit für ein gestörtes Terzband

Literatur

[1] Zwicker, E. und Fastl, H.: Psychoacoustics. Facts and Models, Springer Verlag, ISBN 3-540-65063-6, 1990

[2] Grimm, M.; Kroschel, K.; Schuller, B.; Rigoll, G.; Moosmayr, T.: Acoustic Emotion Recognition in Car Environment Using a 3D Emotion Space Approach., Proc. DAGA 2007, 2007

[3] Heldmann, K.: Wahrnehmung, gehörgerechte Analyse und Merkmalsextraktion technischer Schalle, VDI-Verlag, 1994

[4] Heldmann, K.; Keiper, W.: Analyse von instationären technischen Geräuschen, Proc. DAGA Paper, 1991

[5] Hoffmann, P.: Reiberregte Schwingungen, Haus der Technik Essen / RWTH Aachen, 2006

[6] Kavarana, F.; Rediers, B.: Squeak and Rattle – State of the Art and Beyond, Proc. Sound and Vibration, April 2001

[7] Kuitzsch, W.: Schwing- und Stoßprüfsignale, Spectral Dynamics, 2005

[8] Naganarayana, B. P., u.a.: N-hance: Software for identification of critical BSR locations in automotive assemblies using finite element models, SAE Paper #03NVC-283, 2001

[9] Schuller, B.; Rigoll, G.; Grimm, M.; Kroschel, K.; Moosmayr, T.; Ruske, G.: Effects of In-Car Noise-Conditions on the Recognition of Emotion within Speech, Proc. DAGA 2007, 2007

[10] Steinberg, K.: Mit allen Sinnen, edition anderswo, 2004

[11] Uchida, H.; Ueda, K.: Detection of Transient Noise of Car Interior using Non-stationary Signal Analysis, SAE Paper 980589, 1998

[12] Vormann, M.; Weber, R.: Gehörgerechte Darstellung von instationären Umweltgeräuschen mittels Fourier-Time-Transformation (FTT), Proc. DAGA 95, 1995

[13] Weck, M.: Werkzeugmaschinen und Fertigungssysteme – Bd. 2: Konstruktion und Berechnung. 7. Aufl., Springer, 2002

[14] Nettelbeck, C.; Sellerbeck, P.: Analyse und Bewertung typischer Geräuschmuster von Verbrennungsmotoren, 5. Magdeburger Symposium Motor- und Aggregate-Akustik, 2007

[15] Moosmayr, T.: Objektivierung von transienten Störgeräuschen im Fahrzeuginnenraum, Dissertation, Technische Universität München, 2008

[16] Moosmayr, T.; Leitz, P.; Ruske, G.: Detection and Separation of Different Squeak and Rattles in Airborne Sound, Proc. FISITA 2008: F2008-12-046, 2008

[17] Moosmayr, T.; Schilp, A.; Ruske, G.: Design of a Swept Sine for a Realistic S&R Reproduction – Evaluation and Analysis of Rattle Noise in Car Environment, Proc. 5th Int. Styrian NVH Congress, 2008